

# L'auscultation des barrages en terre : une nécessité

Stéphane Bonelli<sup>a</sup>, Krzysztof Radzicki<sup>ab</sup>, Jerzy Szczesny<sup>b</sup>, Rémy Tourment<sup>a</sup> et Huguette Félix<sup>a</sup>

Une collaboration tripartite développée entre le Cemagref, l'ENGREF et l'UPK (Université polytechnique de Cracovie) porte sur des disciplines telles que l'hydrologie et l'hydraulique, appliquées à la prévention des crues, la gestion et la conception des ouvrages hydrauliques, la prévention et l'analyse de risques ainsi que la qualité et la gestion des milieux aquatiques continentaux. Cet article est un exemple des travaux issus de cette collaboration.

*Dans le domaine des barrages comme dans bien d'autres cas, le risque zéro n'existe pas, d'où la nécessité d'un suivi méthodique du comportement des ouvrages. Après avoir exposé les principes de base de la surveillance et de l'auscultation des barrages, les auteurs nous rappellent ici les objectifs de l'analyse des différentes mesures, à travers deux méthodes différentes appliquées à deux exemples d'ouvrage. Ces deux cas montrent à quel point il est indispensable de disposer et de pouvoir interpréter des données d'auscultation pour évaluer la sécurité d'un barrage.*

La surveillance des barrages est basée sur l'inspection visuelle et l'auscultation. Ces deux méthodes sont complémentaires :

– l'inspection visuelle est une méthode qualitative qui est fondamentale car elle intègre la complexité du comportement de l'ouvrage ;

– l'auscultation est une méthode quantitative qui met en œuvre une instrumentation et une analyse des mesures spécifiques à chaque ouvrage.

L'auscultation est indispensable pour le suivi du barrage, de sa conception à sa mise hors service. C'est une composante de son comportement structurel et du contrôle de la sécurité. Elle est également précieuse pour faire progresser la connaissance sur le comportement et le vieillissement du barrage, et permettre d'améliorer les études et expertises dans leurs différents aspects techniques et économiques (Poupart *et al.*, 2000). De ce point de vue, l'auscultation est une composante essentielle de progrès. Elle permet d'indiquer à l'exploitant avant qu'il ne soit trop tard les travaux de confortement nécessaires et, dans les cas extrêmes, les mesures d'urgence assurant la protection des populations en aval.

Le suivi du vieillissement est indispensable. L'accélération – toujours préoccupante – d'un phénomène doit être détectée le plus tôt possible. Une véritable surveillance de l'ouvrage suppose que

l'on puisse suivre l'évolution de son comportement dans le temps, déduction faite des variations dues aux autres causes.

## L'auscultation

Les types de mesures et d'appareils les plus répandus pour l'auscultation des barrages en remblai sont brièvement décrits ci-dessous. Ces mesures portent sur les sollicitations et sur la réponse de l'ouvrage. Les deux sollicitations principales sont la cote du plan d'eau et les précipitations.

**La cote du plan d'eau** est mesurée par une échelle limnimétrique (visuel) ou un limnimètre enregistreur (précision  $\approx$  centimètre) ;

**Les précipitations** sont obtenues par un pluviomètre installé sur le barrage, relevé quotidiennement (précision  $\approx$  millimètre/jour).

Il peut parfois être nécessaire de prendre en compte d'autres sollicitations : niveau aval, nappe de versant ou fonte des neiges.

La réponse de l'ouvrage est appréhendée par des mesures de déplacements et des mesures hydrauliques.

Les mesures de déplacements sont de trois types (cf. encadré 1 (p. 14) pour les définitions) :

– **les déplacements de surface**, mesurés par nivellement et planimétrie (tassements, mouvements

## Les contacts

<sup>a</sup> Cemagref, UR Ouvrages hydrauliques et hydrologie, Le Tholonet, 13612 Aix-en-Provence

<sup>b</sup> Institut d'aménagement hydraulique et de gestion de l'eau, Cracow University of Technology, Ul. Warszawska 24, 31-155 Krakow, Pologne

amont/aval et rive/rive). Ces mesures mobilisent des compétences spécialisées, une fois ou deux fois par an ;

– **les déplacements en profondeur**, mesurés par des instruments installés le plus souvent lors de la construction (pendule, inclinomètre, élongamètre, extensomètre, distofoir, tassomètre) ;

– **les déplacements relatifs, le long d'un joint ou d'une fissure**, quantifiés par des instruments le plus souvent installés à la demande (fissuromètre, vinchon).

Les mesures hydrauliques sont les suivantes :

– **les débits de fuite**, mesurés par empotement (collecte chronométrée avec un récipient gradué) ou par seuil calibré (déversoir à seuil avec limnimètre, puis utilisation d'une loi de seuil pour estimer le débit). Ils concernent les drains, les puits de décompression, les zones de résurgence ;

– **les charges hydrauliques**, mesurées par des piézomètres. Le piézomètre à tube ouvert est le système le plus simple et le plus robuste. Il est implanté dans le corps du barrage, dans la fondation, les rives ou en aval. Il peut être installé à tout moment, par exemple pour un renforcement de l'auscultation. Il s'agit d'un forage de faible diamètre, équipé d'un tubage de quelques centimètres et crépiné en partie inférieure sur une hauteur définissant la chambre de mesure. La mesure se fait à l'aide d'une sonde donnant

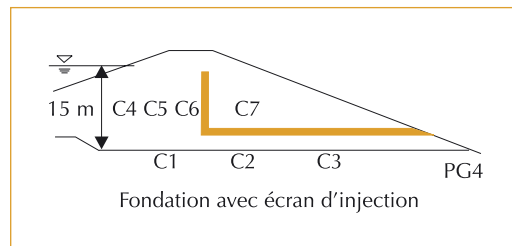
la différence de cote entre la nappe et la tête du piézomètre, préalablement nivelée. La précision est de l'ordre du centimètre ;

– **les pressions interstitielles**, mesurées par des cellules de pression interstitielle, appareils de faible dimension installés lors de la construction dans le corps du barrage ou dans la fondation. Le principe de mesure de la pression dépend du type d'appareil (cellule à contre-pression ou cellule à corde vibrante). La précision est 0,1 à 1 kPa (soit 1 à 10 cm).

Dans le corps du barrage en remblai, un dispositif complet comprend plusieurs profils amont/aval permettant d'évaluer la saturation du corps du barrage, et un ou plusieurs points de mesure de débits dont le rôle est de détecter l'apparition et l'évolution de zones de fuite. La fondation, les appuis, les rives et la plateforme aval doivent également être auscultés. La figure 1 est un exemple d'auscultation du corps d'un barrage en amont du drain cheminée et de l'interface base/fondation par des cellules à corde vibrante. La figure 2 montre un dispositif de piézomètres auscultant les abords de ce barrage.

Pour un barrage en service, la périodicité est dite normale. Dans une situation particulière (construction, premier remplissage, vidange et remplissage, travaux importants), la périodicité est resserrée. Celles-ci sont toujours spécifiques à l'ouvrage. Il est indispensable de réaliser des mesures de manière continue dans le temps. Plus encore que leur valeur absolue, c'est en effet l'évolution des phénomènes dans le temps qu'il est essentiel de connaître. L'accélération d'un déplacement ou la montée brutale d'une pression d'eau sont des exemples de comportement qu'il est capital de déceler à temps. Il est également indispensable de réaliser des mesures de manière homogène dans le temps.

► Figure 1 – Coupe et implantation des cellules de pression (barrage de Chamboux).



#### Encadré 1

##### Quelques définitions

**Pendule** : appareil qui permet de mesurer les déplacements relatifs horizontaux, dans les deux directions, entre deux points situés sur la même verticale. Il peut être direct, il est alors constitué d'un fil d'acier fixé à son extrémité supérieure, l'autre étant relié à un poids pouvant se déplacer librement à la base du pendule. Il peut être inversé, l'extrémité inférieure du fil est fixée au barrage ou à sa fondation, la partie supérieure est mise en tension à un flotteur.

**Vinchons** : appareil qui, scellé de part et d'autre d'un joint ou d'une fissure, permet de mesurer, dans les trois directions, les déplacements relatifs des deux plots ou des deux parois de la fissure.

**Inclinomètre** : une sonde mobile se déplace dans un tube guide. L'ensemble permet de mesurer l'inclinaison d'un forage, l'évolution d'un glissement de terrain ou les déformations horizontales d'un sol.

L'analyse comparée de l'évolution de plusieurs grandeurs est parfois indispensable pour conclure. C'est notamment le cas du couple pression interstitielle/débit de fuite. La diminution d'un débit de fuite est un exemple de comportement qui nécessite la connaissance de la piézométrie dans la zone concernée. Si celle-ci diminue, on peut conclure à un auto-colmatage du corps du barrage (phénomène rassurant). *A contrario*, si celle-ci augmente, on peut soupçonner un colmatage du dispositif de drainage (phénomène très inquiétant).

### L'analyse des mesures d'auscultation

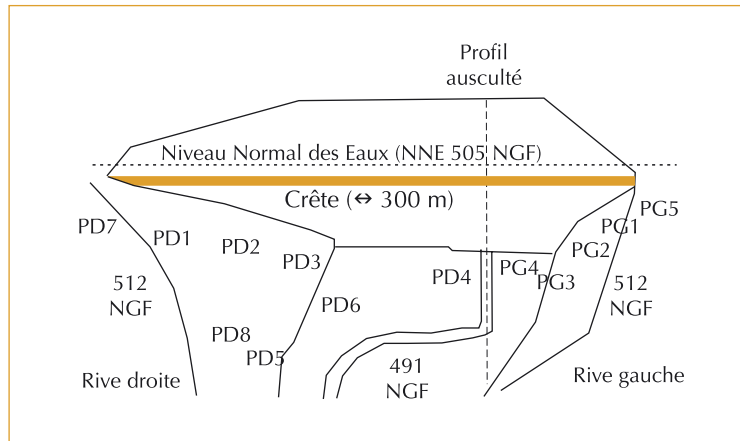
L'auscultation vise à détecter suffisamment tôt des discontinuités, des évolutions significatives, des irréversibilités traduisant des désordres. Il s'agit toujours *in fine* de grands déplacements de masses ou d'interface, annoncés par des phénomènes précurseurs : montée de pression interstitielle, fissures, ouverture de joints... Voici quelques exemples d'évolutions susceptibles de conduire à des désordres, voire à des ruptures, et dont les signes avant-coureurs sont recherchés par l'analyse des mesures d'auscultation.

#### Déplacements

- Un tassement excessif de la crête entraîne une diminution de la revanche (différence entre la cote de la crête et la cote des plus hautes eaux de projet), ce qui diminue la sécurité du barrage vis-à-vis du risque de surverse. Ce tassement peut refléter une forte compressibilité de la fondation, ou un compactage insuffisant du corps du barrage.
- Des amorces de glissement dans le talus aval du barrage, le talus des rives ou les versants de la retenue, sont susceptibles de remettre en cause la stabilité de ces talus. L'implantation d'inclinomètres peut permettre de localiser la zone de glissement en profondeur et de suivre l'évolution du glissement.

#### Piézométrie et pression interstitielle

- Une piézométrie élevée ou en augmentation dans le corps du barrage est toujours inquiétante. Elle peut être le signe d'un contournement du drain ou d'une alimentation par un versant. Dans tous les cas, la stabilité du barrage est remise



en question. Si la ligne piézométrique vient affleurer le talus aval, des suintements peuvent évoluer vers une érosion interne (renard).

▲ Figure 2 – Vue en plan et implantation des piézomètres (barrage de Chamboux).

- Une piézométrie élevée ou en augmentation dans la fondation est préjudiciable à la stabilité de l'ouvrage. Elle peut être imputée à une déficience des dispositifs d'étanchéité de la fondation et des appuis.
- Une diminution de la piézométrie est en général favorable. Elle peut refléter la dissipation des pressions interstitielles de construction ou une diminution de la perméabilité des matériaux par auto-colmatage.

#### Débit de fuite

- Une diminution des débits peut être imputée à une amélioration naturelle de l'étanchéité du barrage et de sa fondation par colmatage à l'amont, évolution qui est favorable. Cette diminution peut également refléter un colmatage des drains, qui se trouvent peu à peu contournés et ne contrôlent plus les débits de fuite. Ce colmatage peut être la conséquence d'un phénomène d'érosion interne (suffusion). Dans ce cas très inquiétant, la piézométrie va augmenter et les écoulements non contrôlés peuvent être à l'origine d'érosion interne (renard) ou de glissements du talus aval. Seule la mesure du couple piézométrie/débit permet un diagnostic.
- Une augmentation anormale des débits peut être imputée à une alimentation par un versant, mais aussi à un processus d'érosion interne (renard ou suffusion). Dans ce dernier cas, les eaux collectées peuvent être chargées d'éléments fins issus du corps du barrage.

## Exemple d'analyse, barrage de Chamboux (France)

Une véritable surveillance de l'ouvrage suppose que l'on puisse suivre l'évolution de son comportement dans le temps, déduction faite de toute autre variation : c'est l'analyse à « conditions constantes ». C'est précisément ce que stipule la réglementation française (encadré 2) relative à l'inspection et à la surveillance des barrages intéressant la sécurité publique, c'est-à-dire dont la rupture éventuelle aurait des répercussions graves pour les personnes, quelle qu'en soit la hauteur.

L'analyse à conditions constantes suppose que l'on soit capable de quantifier l'influence des principales sollicitations : la cote du plan d'eau, les effets saisonniers et les précipitations. C'est l'objet de l'analyse des mesures d'auscultation, qui peut être réalisée avec les méthodes de type hydrostatique-saison-temps (également appelées *hydrostatic-season-time* ou HST<sup>1</sup>). Pour un ouvrage en service, les sollicitations provoquent des déformations réversibles puisque le dimensionnement a été réalisé en conséquence : les limites de stabilité ou de résistance ne sont pas atteintes. L'analyse des mesures d'auscultation permet alors de ramener les mesures à conditions constantes afin de quantifier les phénomènes évolutifs et irréversibles. La vitesse d'évolution peut être positive (augmentation avec le temps) ou négative (diminution avec le temps), et peut être accélérée ou amortie. Cette évolution est alors à interpréter en tenant compte de la connaissance de l'ouvrage que l'on a par ailleurs : dissipation des pressions interstitielles de construction, colmatage du tapis drainant,

évolution des perméabilités... La périodicité est biennale pour l'analyse et l'interprétation des mesures d'auscultation.

Les méthodes HST ont été proposées dans les années 1960 par Électricité de France pour analyser les mesures de déplacements issues de penoules de barrages voûtes (Ferry et Willm, 1958). Ces méthodes sont actuellement utilisées dans plusieurs pays pour analyser d'autres types de mesures. L'expérience acquise depuis quelques décennies sur plusieurs centaines de barrages a confirmé l'excellence de l'approche comme un outil puissant d'interprétation des mesures d'auscultation, comme le soulignent régulièrement les rapports de la Commission internationale des grands barrages. Le modèle HST standard est basé sur trois effets. Le premier est l'effet hydrostatique, qui rend compte des variations de la mesure provoquées par la retenue. Le second effet est la date dans l'année, qui rend compte des variations saisonnières de la mesure, de périodes douze mois et six mois. Le troisième effet rend compte de l'influence du temps, dont le vieillissement. Afin de permettre l'analyse de grandeurs hydrauliques, la prise en compte de la pluie est nécessaire, ce qui constitue un quatrième effet à intégrer à un modèle HST. Le Cemagref a développé une variable explicative de la pluie dans les années 1980 (cf. Bonelli *et al.*, 2003, pour une description détaillée, et Bonelli, 2004, pour un historique détaillé).

À titre d'illustration, les niveaux piézométriques du barrage de Chamboux (France) sont analysés (cf. Bonelli *et al.*, 2003, pour une analyse détaillée). Il s'agit d'un barrage en terre homogène de 15,5 m de hauteur. La fondation est consti-

1. Méthode statistique de séparation des effets hydrostatique (H), saisonnier (S) et temporel (T) irréversible, conçue à l'origine par EDF.

### Encadré 2

#### La réglementation

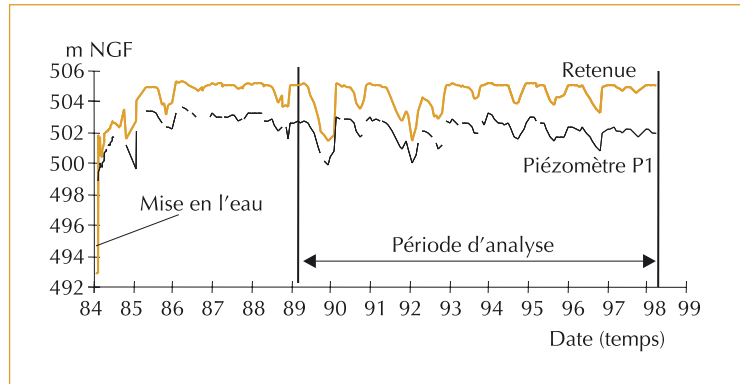
En France, la circulaire n° 70-15 du 14 août 1970 *relative à l'inspection et à la surveillance des barrages intéressant la sécurité publique*, modifiée par la circulaire n° TE/8562 du 29 septembre 1983, définit le contrôle des barrages par les services de l'État. Elle impose au propriétaire le devoir de la préparation d'un rapport chaque année pour le service du contrôle. Ce rapport sur la surveillance et l'auscultation du barrage donne d'une part, des renseignements succincts sur l'exploitation des ouvrages au cours de l'année, sur les incidents constatés et les travaux effectués, et d'autre part, sous forme de graphiques, les résultats des mesures effectuées ainsi que leur interprétation. Ce rapport comporte obligatoirement, tous les deux ans, une analyse approfondie de l'évolution du comportement de l'ouvrage. La circulaire décrit aussi les appareils d'auscultation qui peuvent être installés sur le barrage.

En Pologne, *la loi sur la construction* (du 7 juillet 1994 modifiée le 11 juillet 2003) impose au propriétaire le devoir de réaliser la surveillance et l'auscultation du barrage, ainsi qu'une visite annuelle de contrôle du barrage plus approfondie, tous les cinq ans, par le service de contrôle. Sur la base de ces contrôles ainsi que sur la base des résultats des mesures, un rapport d'évaluation de l'état de l'ouvrage est élaboré par un expert. De plus, *la loi sur l'eau* définit en détail les éléments d'auscultation des barrages.

tuée d'arènes granitiques (perméabilité  $10^{-5}$  à  $10^{-6}$  m/s) et étanchée par un voile d'injection. Le remblai comporte des arènes (perméabilité  $10^{-8}$  à  $10^{-9}$  m/s) à l'amont du drain vertical. Le drain est raccordé à l'aval par des cordons drainants entourés de filtres. Des puits de décompression verticaux débouchent dans un caniveau de pied qui récupère aussi les eaux drainées. Le barrage a été mis en eau en 1984.

Le dispositif de mesures hydrauliques comporte – entre autres – treize piézomètres à lecture directe en aval du barrage et sept cellules de pressions interstitielles dans le corps du barrage, dans l'axe de l'évacuateur (figures 1 et 2, p. 14 et p. 15). L'analyse HST de ces vingt instruments est réalisée pour la période 1989/98, soit neuf ans et environ cent mesures par instrument. La précision est de l'ordre du centimètre.

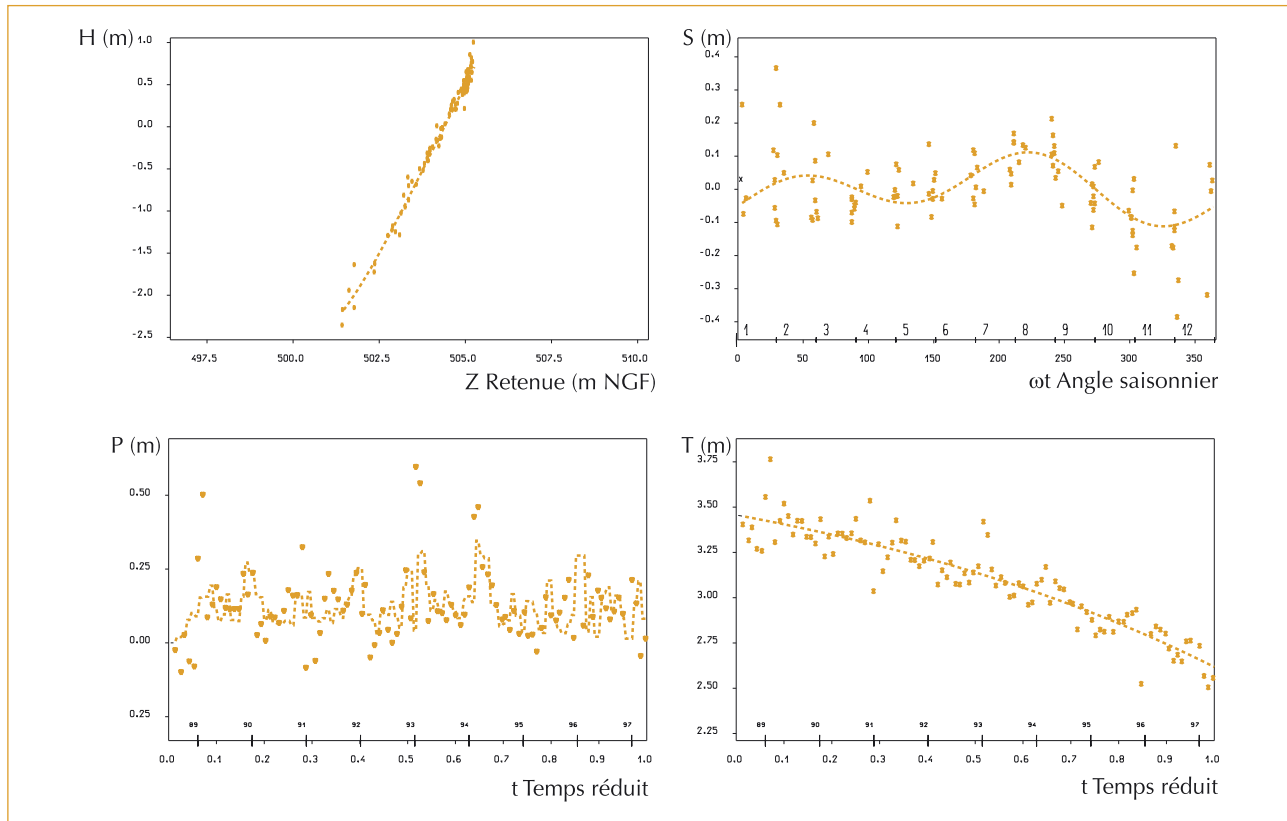
En moyenne, la variation des niveaux est expliquée à 30 % par la variation de la cote du plan d'eau, à 19 % par la pluviométrie, à 15 % par les effets saisonniers et à 6 % par des évolutions



dans le temps. Pour certains piézomètres, la part explicative de la pluie peut atteindre 38 %.

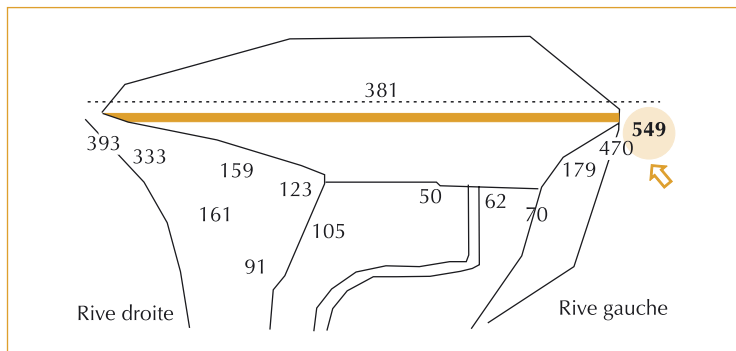
Un exemple de résultat détaillé est donné figure 3 (courbe brute et variations de la retenue) et figure 4 (résultats de l'analyse). La variation des niveaux est essentiellement imputable à la retenue. L'effet saisonnier est significatif, avec un maximum en été et un minimum juste avant l'hiver.

▲ Figure 3 – Cote de la retenue et niveau piézométrique pour un piézomètre du barrage de Chamboux (PD1).



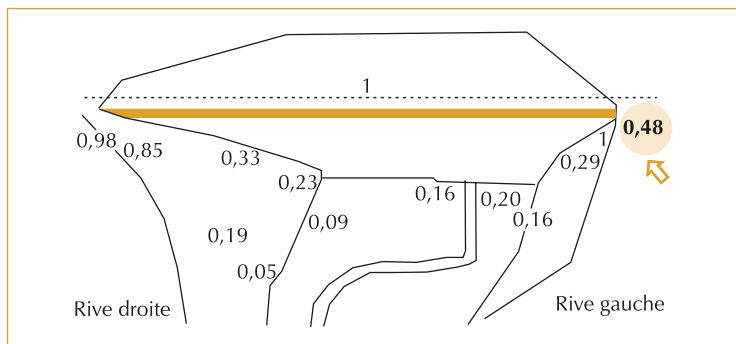
▲ Figure 4 – Influence de la retenue, de la saison, de la pluie et du temps (PD1). Les courbes représentent le modèle. Les symboles représentent la mesure corrigée.





▲ Figure 5 – Amplitude de variation totale (cm).

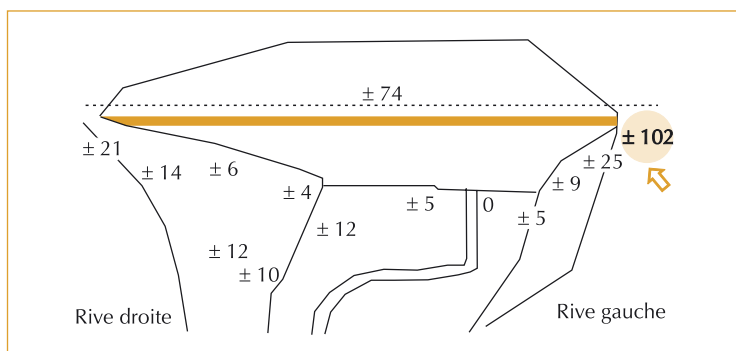
Pour mieux appréhender le comportement global de l'ouvrage, nous définissons quelques indicateurs et nous les reportons sur des vues en plan. Parmi ceux-ci, l'influence de la cote du plan d'eau, appelé  $\alpha$ , représente le ratio variation de la mesure sur variations du niveau de la retenue.



▲ Figure 6 – Influence de la cote du plan d'eau  $\alpha$ .

Lorsque les mesures ne sont pas influencées par la retenue,  $\alpha = 0$ . Aux abords du barrage, le bon fonctionnement du voile d'étanchéité est illustré par la décroissance, des rives vers le fond de vallée, des amplitudes de variation des niveaux (figure 5) et du coefficient  $\alpha$  (figure 6). Le contournement par les rives du voile d'étanchéité est illustré par un coefficient  $\alpha$  proche de 1 en haut des rives. Toutefois, ce contournement se

▼ Figure 7 – Amplitude de variance saisonnière ( $\pm$  cm/an).



fait au large, puisque les valeurs de  $\alpha$  décroissent vers le fond de vallée (figure 6). Les variations saisonnières représentent 5 à 10 % des variations totales (figure 7). Les évolutions dans le temps des niveaux sont faibles par rapport aux amplitudes de variation, ce qui est sécurisant (figure 8).

Un piézomètre situé en rive gauche près de la crête est remarquable : variations beaucoup plus importantes que celles de la retenue (549 contre 381 cm, figure 5), partiellement imputables à la retenue ( $\alpha = 0,48$  ; figure 6), variations saisonnières les plus élevées ( $B = \pm 102$  cm/an, figure 7). Ce comportement est dû à la présence d'une nappe de coteau, identifiée dès le projet. L'analyse HST permet un diagnostic : les niveaux ne causent pas d'inquiétude, ils restent inférieurs à la cote du terrain naturel et n'indiquent aucune évolution dans le temps.

Le dispositif d'auscultation montre un comportement satisfaisant. *A contrario*, l'inspection visuelle a révélé des désordres sur le remblai, mais ceci n'est pas le sujet de cet article.

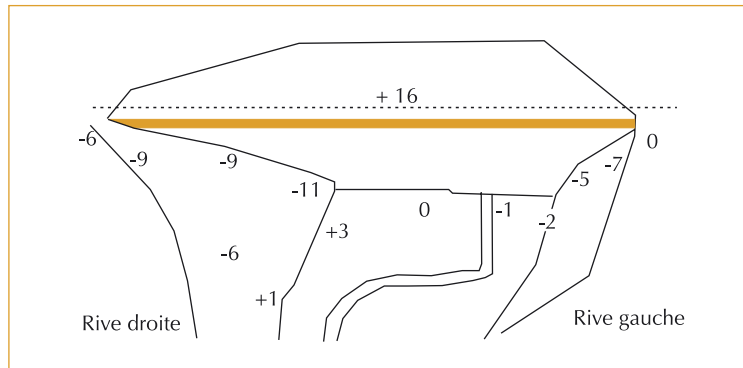
### Exemple d'analyse, barrage de Klimkowka (Pologne)

Le barrage de Klimkowka est un barrage en terre zoné. Construit en 1994, il est situé au sud de la Pologne, sur la rivière Ropa. Sa hauteur maximale est 33 m, sa longueur en crête est 210 m, la capacité du réservoir est de 43,5 Mm<sup>3</sup> et la surface de la retenue est de 3,06 Mm<sup>2</sup>. Une galerie et un écran d'injection assurent l'étanchéité du barrage, sous le noyau central en argile. Ce noyau est protégé par un filtre bi-couches, lié par une lanière drainante horizontale à un tapis drainant aval au pied du barrage (figure 9). Des couches épaisses de grès séparées par des couches fines de schiste constituent la fondation du barrage. Ces couches descendent sous le réservoir avec un pendage de 45°-57°.

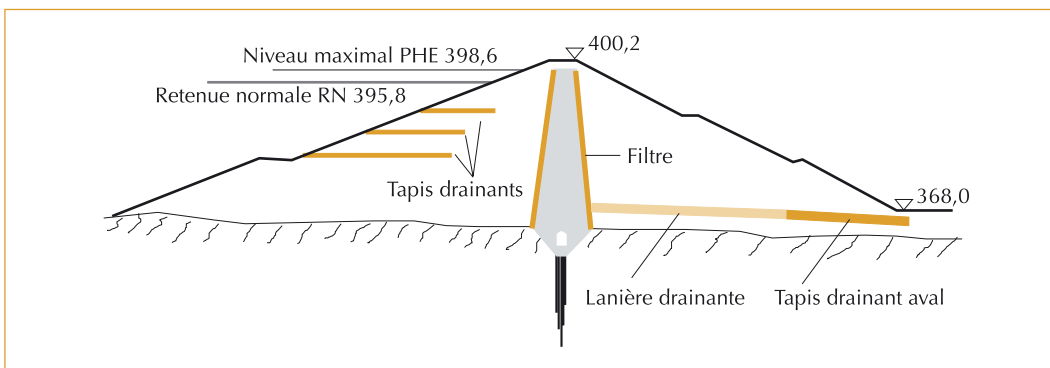
Des phénomènes d'écoulement *a priori* anormaux ont été constatés en 2003, entre le 11 mars et le 16 avril 2003. Les niveaux amont (réservoir) et aval, les niveaux piézométriques, les débits de drainage, les précipitations et les températures ont alors été relevées quotidiennement. La figure 10 montre l'emplacement des piézomètres. La figure 11 (p. 20) contient le report de ces mesures pour la période du 17 janvier 2003 au 16 avril 2003.

Analysons dans un premier temps les débits de drainage. En décembre 2002, le niveau du

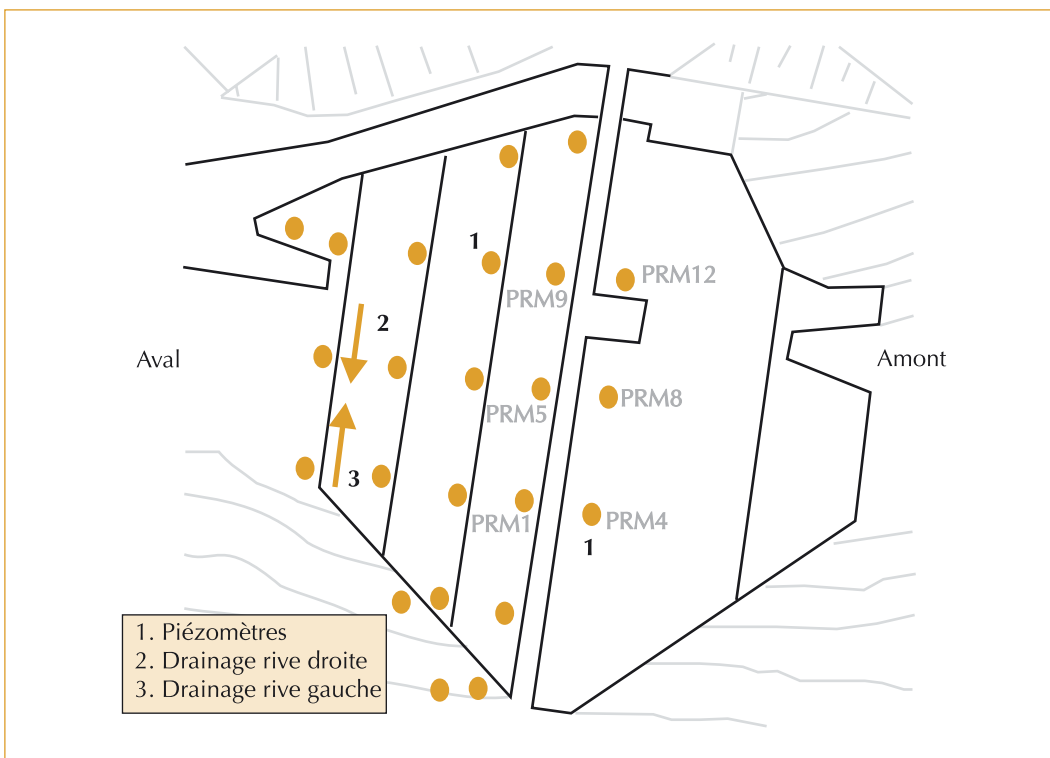
réservoir diminue. En conséquence les débits de drainage (droit et gauche) diminuent, jusqu'à un assèchement total (le 20 janvier 2003 pour le drainage gauche, et le 27 février pour le drainage droit). Ce phénomène est également lié à la baisse du niveau aval, qui induit en outre une désaturation du remblai sous le niveau du drain. Bien que le niveau aval soit bas et que le niveau amont continue de diminuer, le drainage gauche recommence à couler le 27 février (2 l/min). Ce phénomène peut être expliqué par une analyse fine des mesures, qui intègre l'ensoleillement du talus de la colline. Depuis la fin février, l'ensoleillement et les températures augmentent.



▲ Figure 8 – Vitesse d'évolution annuelle à conditions constantes (cm/an).

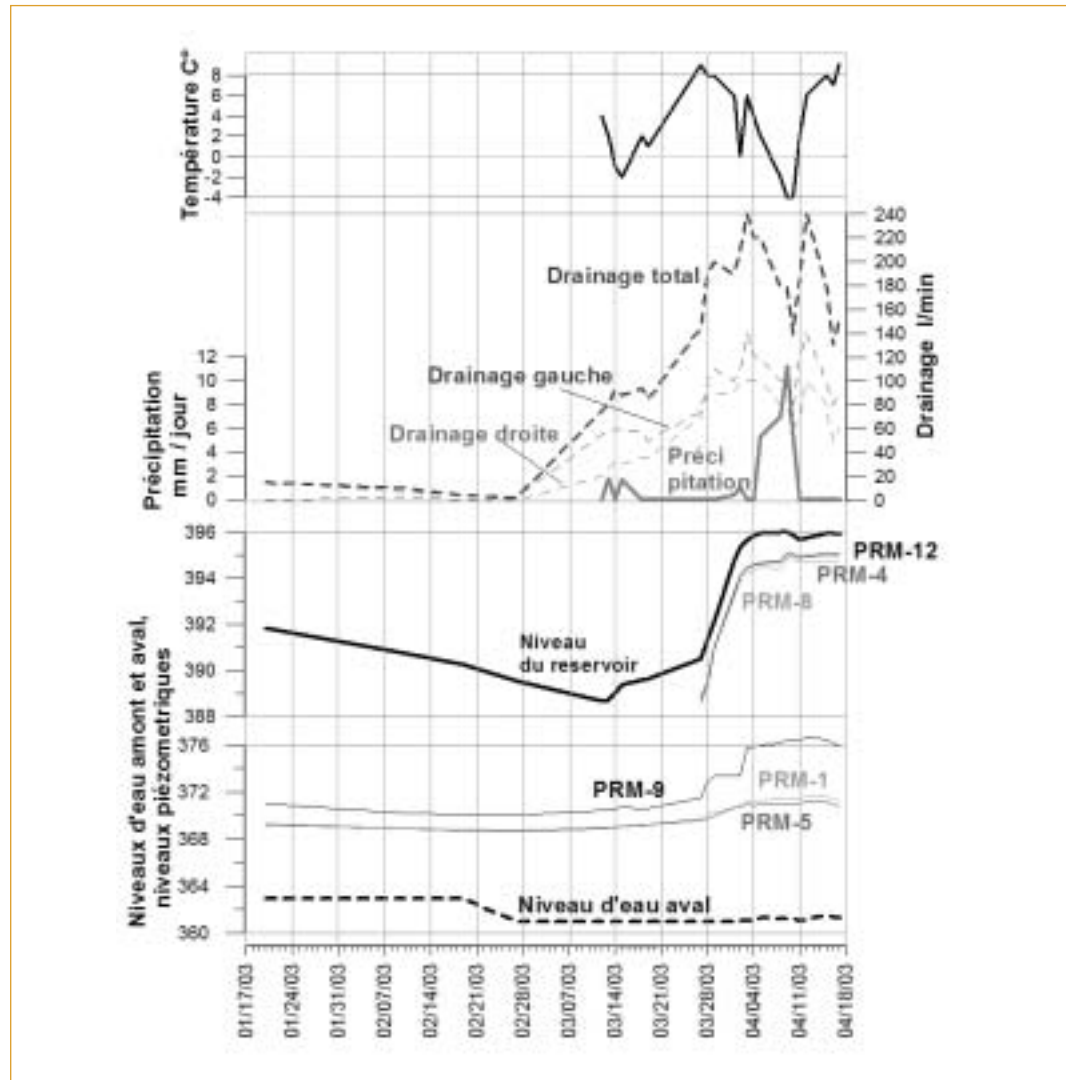


◀ Figure 9 – Coupe et implantation des cellules de pressurage (barrage de Klimkowska).



◀ Figure 10 – Implantation des piézomètres (barrage de Klimkowska).

► Figure 11 – Report des mesures d'auscultation (barrage de Klimkowka).



Les talus commencent à rendre l'eau accumulée pendant l'hiver (dont la neige et la glace). Le talus gauche, creux et tourné vers le sud-est, est le plus ensoleillé : il restitue l'eau emmagasinée en premier, avant le talus droit, convexe et tourné vers le nord-ouest. Depuis le 11 mars, date initiale d'enregistrement des valeurs de la température, on constate que les valeurs des débits de drain correspondent à cette évolution.

À partir du 13 mars, l'augmentation du niveau du réservoir influence les débits du drainage. Le système de drainage est réputé sensible aux précipitations : il recueille les eaux de pluie à travers les talus. Toutefois, il n'est pas influencé par la précipitation du 4 au 9 avril. Les précipitations ont eu lieu pendant des périodes de gel

et l'eau a ruisselé. Quand les températures sont devenues positives après le 10 avril, l'eau s'est alors infiltrée dans les talus, et on a observé une augmentation des débits du drainage.

Nous analysons maintenant les piézomètres ouverts PRZ 4, 8 et 12, localisés à l'amont du noyau (figure 10, p. 19). Jusqu'au 26 mars, les mesures n'ont pas pu être réalisées à cause de la présence de glace dans les tubes. Ensuite, les évolutions montrent un retard par rapport à l'augmentation du niveau du réservoir, malgré la présence des trois couches drainantes dans la recharge amont (figure 9, p. 19). Ce retard est dû au temps mis par le remblai pour se saturer, après une période importante à un niveau de retenue bas.



Comment expliquer alors que la réponse des piézomètres PRM 1, 5 et 9, localisés à l'aval du noyau soit instantanée ? Ce comportement pourrait *a priori* être interprété comme révélateur d'une fuite. Toutefois, une analyse plus approfondie des niveaux piézométriques PRM 1, 5 et 9 révèle une augmentation qui précède celle du niveau du réservoir, mais qui est concomitante à l'augmentation des débits du drainage. On en déduit que celle-ci est provoquée par l'écoulement de l'eau des talus de la colline, et qu'il ne s'agit pas d'une fuite. Les observations ultérieures correspondent d'ailleurs à un comportement classique : correspondance entre variations du niveau du réservoir et variations des niveaux piézométriques.

La description présentée ci-dessus est un extrait de l'analyse approfondie, réalisée pour tous les piézomètres du barrage Klimkowka, et qui tient compte de la correspondance avec les niveaux amont et aval, et avec les débits du drainage (Szczyzny et Truty, 2003). La prise en compte des évolutions de la température de l'air a été essentielle pour expliquer les écoulements dans l'ouvrage, bien que la période d'auscultation renforcée soit très courte. Elle a permis d'éviter la mise en œuvre d'investigations coûteuses (utilisation de traceurs et réalisation de forage pour analyser le cheminement de l'eau par exemple).

## Conclusion

Les questions de sécurité liées aux barrages constituent un enjeu. Elles concernent non seulement le barrage lui-même et sa « sécurité intrinsèque », mais aussi ses modalités d'exploitation. Le contrôle du bon état des barrages peut aussi inclure une préoccupation patrimoniale, notamment pour les barrages concédés.

L'analyse des mesures d'auscultation permet d'appréhender le comportement d'un ouvrage, et de fonder les diagnostics. Cette analyse constitue le socle d'une controverse éventuelle dans le cas d'une situation complexe. Deux exemples de méthode sont présentés : l'analyse experte et l'analyse HST (qui nécessite également une part d'expertise). Ces exemples illustrent la grande importance de disposer de mesures d'auscultation pour se prononcer sur une question relative à un barrage.

D'autres méthodes peuvent être utilisées ou être l'objet de recherche. Un modèle d'analyse permettant de tenir compte d'un retard entre la sollicitation et la réponse a été récemment développé et est en cours de transfert (Bonelli, 2004). Ce retard peut être d'origine hydraulique, par diffusion de Darcy (Bonelli et Royet, 2001), ou d'origine thermique, par diffusion de Fourier (Bonelli et Félix, 2001).

Toutefois, pour qu'il soit possible de mettre en œuvre une méthode d'analyse des mesures – voire de mener des recherches pour améliorer ces méthodes ou en élaborer de nouvelles – il est nécessaire de disposer de mesures de qualité (fiabilité des instruments, vérification périodique de leur bon fonctionnement, représentativité de la mesure, estimation de son incertitude, sérieux de l'opérateur, vérification de la mesure) : c'est la conclusion essentielle. Les statistiques montrent qu'il existe une forte corrélation entre les plus graves accidents de barrages et l'absence d'auscultation organisée (Londe, 1990). La qualité du diagnostic qui pourra être proposé reflètera la qualité du dispositif d'auscultation et de la réalisation des mesures. □

## Résumé

Pour comprendre le comportement à long terme d'un barrage, il est essentiel d'interpréter soigneusement les données d'auscultation mesurées. Le contrôle de la sécurité d'un barrage exige que les données mesurées soient interprétées dans le temps le plus court possible après les lectures. En ce qui concerne les méthodes d'interprétation et d'analyse de telles données, il y a des pratiques et des points de vue variables. Toutefois, dans tous les cas, il est essentiel de disposer de mesures d'auscultation. Les principes de base de l'auscultation des barrages sont exposés, ainsi que les objectifs de l'analyse des mesures. La grande valeur de cette analyse est illustrée sur deux exemples mettant en œuvre deux méthodes différentes. Le premier exemple porte sur les niveaux piézométriques d'un barrage en terre homogène de 15,5 m de hauteur (barrage de Chamboux, France). La méthode est basée sur une analyse statistique dénommée hydrostatique-saison-temps (ou HST). Le report de quelques indicateurs sur les plans du barrage permet une analyse globale de son comportement. Le second exemple concerne un barrage en terre zoné de 33 m de hauteur (barrage de Klimkowka, Pologne). La méthode est basée sur une analyse experte des mesures. L'objet de ce papier n'est pas de décrire les méthodes mises en œuvre, mais de souligner la nécessité de disposer de mesures d'auscultation pour évaluer la sécurité d'un barrage.

## Abstract

To understand the long-term behaviour of a dam, it is essential to carefully interpret the measured data. Effective control of dam safety requires that measured data has to be interpreted as fast as possible after the readings. In regards to the methods of interpretation and analysis of such data, there are different practices and varying viewpoint. However, in every case, it is essential to have monitoring data. The basic principles of dam monitoring are exposed, as well as the objectives of the analysis of the measures. The value of such an analysis is illustrated on two examples operating two different methods. The first example concerns the piezometric levels of a homogeneous earthdam of 15,5 m of height (Chamboux dam, France). The method is based on a statistical analysis called Hydrostatic-Season-Time (or HST). The location of some indicators on the plans of the dam allows a global analysis of its behavior. The second example concerns a zoned earthdam of 33 m of height (Klimkowka dam, Poland). The method is based on an expertise of the measures. The object of this paper is not to describe the methods, but to convince the necessity of having monitoring data to estimate the safety of a dam.

## Bibliographie

- BONELLI, S. ; ROYET, P., 2001, Delayed response analysis of dam monitoring data, *Proc. Int. Symposium on Dam Safety*, Geiranger, Balkema Rotterdam, p. 91-100.
- BONELLI, S. ; FÉLIX, H., 2001, Delayed analysis of temperature effect, *6th ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, Salzburg, 6 p.
- BONELLI, S. ; TOURMENT, R. ; FÉLIX, H., 2003, Analysis of earthdam monitoring data, *Séminaire franco-polonais Cemagref et Université Polytechnique de Cracovie*, p. 133-150.
- BONELLI, S., 2004, Analyse retard des mesures d'auscultation de barrages, *Revue Française de Géotechnique*, n° 108, p. 31-45.
- FERRY, S. ; WILLM, G., 1958, Méthodes d'analyse et de surveillance des déplacements observés par le moyen de pendules dans les barrages, *VI<sup>th</sup> International Congress on Large Dams*, New-York, ICOLD, vol. II, p. 1179-1201.
- LONDE, P., 1990, La sécurité des barrages, *Revue Française de Géotechnique*, n° 51, p. 41-49.
- POUPART, M. ; DE LUSTRAC, J. ; BOURGEY, P. ; BONELLI, S., 2000, Les enjeux économiques de l'auscultation pour la maintenance des barrages, *20<sup>e</sup> Congrès des Grands Barrages*, Beijing, p. 1063-1073.
- SZCZESNY, J. ; TRUTY, A., 2003, Dam surveillance and maintenance – general approach and case studies, *Séminaire franco-polonais Cemagref et Université Polytechnique de Cracovie*, p. 151-166.